

УДК 551.465

Р.Х. Мазова¹, Х.Ф. Рамирес², Н.А. Баранова¹, А.Г. Рассадин¹

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ЦУНАМИ В ЧИЛИ. СВИДЕТЕЛЬСТВА ОПРАВДАВШЕГОСЯ ПРОГНОЗА

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,²Инженерный центр по чрезвычайным природным ситуациям, Антофагаста, Чили²

Цель работы: В работе анализируются катастрофические сейсмические события у побережья Чили 27 февраля 2010 г. магнитудой 8,8 в 150 км на северо-запад от Консепсьона и 1 апреля 2014 г. к северу от г. Икике с магнитудой 8,2 и генерированные ими цунами. Отмечается, что произошедшее 1 апреля 2014 г. событие было спрогнозировано в работе [1], где анализировались все сильнейшие чилийские цунамигенные землетрясения с источниками у побережья Чили. Анализ катастрофических землетрясений и цунами в данном регионе, локализации очага исторических землетрясений и характера генерированных ими волн цунами позволили авторам сделать вывод о возможности повторения катастрофического землетрясения и цунами через 10-20 лет, т.е. события около г. Арики в апреле 2014 г. хорошо укладываются в этот временной интервал. Таким образом, в данной работе подтверждается предварительный прогноз, сделанный авторами в 1999 г.

Научный вклад: Подтверждение предварительного прогноза появления катастрофического землетрясения и сильного цунами в районе г. Арика, Чили до 2019 г.

Результат: Используя результаты работы, полученные и опубликованные в 1999 г., и анализируя события 27 февраля 2010 г. и 1 апреля 2014 г. и более детально последних месяцев по землетрясениям и цунами около чилийского побережья, сделан вывод о реализации предварительного прогноза о появлении катастрофического цунамигенного землетрясения у берегов Чили, в центральной части в районе г. Арика в первые 10-20 лет 21 столетия.

Новизна: На основании данных последних катастрофических землетрясений, происшедших в XXI в., проведено численное моделирование этих событий. Подтвержден реализованный предварительный прогноз катастрофического цунами 1 апреля 2014 г.

Ключевые слова: цунами, сейсмическая и цунами опасность, цунамигенные землетрясения, волны цунами, численное моделирование, Чилийское побережье.

Введение

Как было предсказано ранее рядом авторов (например [2]), сейсмическая активность по периметру Тихого океана будет существенно возрастать к концу XX и в начале XXI столетий. Так, произошла целая серия катастрофических землетрясений, сопровождавшихся цунами: в Индийском океане около острова Суматра 26 декабря 2004 г. с магнитудой 9,1; землетрясение и цунами 15 ноября 2006 г. в Курило-Камчатском регионе, катастрофическое землетрясение с магнитудой 8,8, произошедшее в средней части Чили 27 февраля 2010 г.; цунамигенное катастрофическое землетрясение около Японии 11 марта 2011 г. с магнитудой 9,2; мега-землетрясение и цунами в северной части Чили 1 апреля 2014 г. с магнитудой 8,2. Характер генерированных волн цунами для каждого из этих событий, их распространение и поведение в береговой зоне, в литературе достаточно подробно проанализированы [3-10]. Однако геодинамические причины возникновения подобных землетрясений и влияние их на формирование очага цунами исследованы недостаточно полно. Необходимость рассматривать очаг землетрясения более сложной формы, адекватной реализации афтершоков при землетрясении, была показана в наших предыдущих работах [11, 12].

Хорошо известно, что в зонах субдукции сильнейшие землетрясения с $M \geq 7$, как правило, генерируют цунами. События последних лет показали, что разрушения и гибель населения происходят, главным образом, не за счет колебаний поверхности во время самого землетрясения, а в результате следующего за ним цунами [13]. Цунами представляет опасность не только для близлежащего побережья, но и для побережий, расположенных на значительном удалении от области их генерации.

Большинство источников цунамигенных землетрясений в тихоокеанском сейсмическом поясе расположены на террасах континентального склона глубоководных желобов [14], и их свойства существенно определяются типом зоны субдукции. Согласно современным представлениям геотектоники [14, 15], существуют два типа зон субдукции: чилийский тип и марианский тип. Чилийский тип характеризуется глубоководным желобом и сильной связью между континентальной и океанической литосферной плитами в процессе субдукции, и сейсмическая активность в зонах субдукции чилийского типа приводит к сильным цунами. Примерами зон субдукции чилийского типа являются области Курило-Камчатского и Японского глубоководных желобов.

Сейсмическая активность в Чилийской зоне субдукции приводит к появлению сильных цунами, которые не раз накатывались на побережье Чили и приносили большие разрушения и человеческие жертвы [16,17]. Так, исторические записи свидетельствуют, что у побережья Чили произошел ряд катастрофических цунамигенных землетрясений [3,4]. Чили расположено в одном из наиболее сейсмически активных районах мира, с 15-30 слабыми толчками ежедневно в северном Чили. Этот высокий уровень сейсмической активности обусловлен геологической структурой северного Чили, где глубоководный желоб (до 3000 м глубиной) расположен вблизи берега. Однако есть также очень плавный континентальный склон, простирающийся на 150 км от берега до желоба, формируя террасу.

Хорошо известно, что цунамигенные землетрясения, которые происходят около северного побережья Чили, создают опасность для местных берегов и берегов на тысячи километров вне этого побережья. Цунами, возникшие при чилийском землетрясении 1868 г. достигли берегов Новой Зеландии. Аналогично, цунами, вызванное чилийским землетрясением 1960 г., дошло до берегов Камчатского полуострова, Курильских островов и Японии. Исторические записи свидетельствуют, что в XIX в. у северного побережья Чили произошел ряд катастрофических цунамигенных землетрясений [16, 17]. Одно из них 13 августа 1868 г. с предельной магнитудой $M = 8,5$ в районе южного Перу с очагом землетрясения, вытянутым к северному побережью Чили, близ города Арика, вызвавшее большое цунами, впоследствии именовавшееся Арикским. Эпицентр землетрясения находился менее чем в 100 км от берега, на террасе глубоководного желоба и почти во всех береговых пунктах, где было зарегистрировано цунами, оно начиналось с отхода воды от берега, за которым следовал волновой цуг, в котором вторая волна была наиболее разрушительной [1, 18]. Предположительно подвижки были направлены вниз и сопровождались горизонтальными подвижками блоков-клавишей. Подвижки вниз в области сейсмического источника были обращены к побережью Чили. Волны цунами, генерированные этим землетрясением, достигали максимальной высоты заплеска на берегу до 21 м. очевидцы, оставшиеся в живых, так описывали это цунами: «Со стороны океана с громopodobным шумом нахлынула огромная стена фосфоресцирующей и пенящейся воды» или «Океан нахлынул на берег в виде страшной волны, ...несшей на своем гребне суда». Также с очагом у северного побережья Чили 10 мая 1877 г. произошло разрушительное землетрясение с магнитудой $M = 8,8$, которое сопровождалось катастрофическим цунами. В литературе это цунами носит название как цунами Икике. В самом городе Икике высоты волн на берегу достигали 4,8 м, а в различных пунктах побережья Южной Америки волны цунами накатывались на берег с высотой 24 м. Были смыты и разрушены целые кварталы городов. Только в г. Икике погибло 30 человек.

В XX столетии на побережье Чили также произошли три катастрофических землетрясения, сопровождавшихся цунами, из которых два были локализованы на севере Чили. Так, 16 августа 1906 г. в северной части чилийского побережья произошло землетрясение с магнитудой 7,8. Наибольшие разрушения были в г. Вальпараисо. Максимальные высоты волн цунами по побережью достигали 3,5 м. Накат на берег происходил спокойно, в виде подтопления берега. 22 мая 1960 г. произошло разрушительное мега-землетрясение с очагом в южной части среднего Чили с магнитудой $M = 9,5$. Максимальный подъем воды на побережье Чили достигал 25 м. В июле 1995 г. на севере Чили, около г. Антофагаста, произошло разрушительное цунамигенное землетрясение с магнитудой $M = 8,1$.

В XXI в. сильнейшие землетрясения произошли в средней и северной части побережья Чили уже в начале столетия (табл. 1). Так, 27 февраля 2010 г. у берегов Чили произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой 8,8, генерировавшее мощное цунами [18, 19]. Очаг землетрясения ($35,909^\circ$ ю.ш., $72,733^\circ$ з.д.) располагался в море на глубине 35 км под земной корой в 17 км от прибрежных населенных пунктов Куранипе и Кобкекура, в 90 км от столицы Био-Био Консепсьон, в 150 км на северо-запад от Консепсьона и в 63 км к юго-западу от Каукенеса. Чилийское землетрясение вызвало мощное цунами - через двадцать минут после подземного толчка морская волна высотой в два с лишним метра обрушилась на побережье Чили. 1 апреля 2014 г. в северном Чили, произошло землетрясение магнитудой 8,2. Это землетрясение произошло в области исторической сейсмической брешии, называемой северной Чилийской, или Икикской сейсмической брешью. Как показано в работе [1], этому землетрясению с $M = 8,2$ предшествовало землетрясение, которое произошло в этой сейсмической брешии 13 августа 1868 г. с $M = 8,5$, сопровождавшееся катастрофическим цунами в г. Арика.

Таблица 1

Землетрясения и цунами на побережье Чили за 2000-2014 гг.

Дата и время	Координаты эпицентра	Магнитуда	Регион, близлежащие города, высоты волн цунами
1	2	3	4
2014-04-03 02:43:14 UTC	20.518° ю.ш. 70.498° з.д.	7,7	Север Чили. Это землетрясение являлось афтершоком для землетрясения 1 апреля 2014 г. с магнитудой $M=8,2$. Близлежащие города: 1) 49 км на северо-запад от города Икике, 2) 177 км к северу от города Токопильи, 3) 227 км к югу от города Арика, 4) 269 км на северо-запад от города Калама. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Икике – 0,8 м; Альто Хосписио – 0,8 м; Чукумата – 0,8 м; Патинос – 0,7 м; Пунта Негро – 0,6 м; Токопилье – 0,3 м; Арика – 0,2 м
2014-04-01 23:57:57 UTC	19.898° ю.ш. 70.924° з.д.	6,9	Север Чили. Близлежащие города: 1) 89 км от города Икике, 2) 170 км от города Арика. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Икике – 0,6 м; Арика – 0,2 м
2014-04-01 23:46:46 UTC	19.642° ю.ш. 70.817° з.д.	8,2	Север Чили. Близлежащие города: 1) 95 км на северо-запад от города Икике, 2) 139 км от города Арика. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Писагуа - 1,7 м; Юнин - 1,7 м; Икике – 1,6 м; Пунта Негра – 1,6 м; Альто Хосписио – 1,6 м; Кьюкумата – 1,3 м; Арика – 0,7 м
2014-03-16 21:16:30 UTC	19.925° ю.ш. 70.628° з.д.	6,7	Север Чили. Близлежащие города: 1) 60 км от города Икике, 2) 164 км от города Арика, 3) 216 км от города Танка, Перу, 4) 244 км от города Токопильи. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Писагуа - 0,1 м; Юнин - 0,1 м; Икике – 0,1 м; Пунта Негра 0,1 м
2012-04-17 03:50:16 UTC	32.701° ю.ш. 71.484° з.д.	6,7	Центральная часть севера Чили. Близлежащие города: 1) 42 км от города Вальпараисо, 2) 81 км от города Лос Ангес. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Консон – 0,1 м; Лас Рамадитас – 0,1 м; Ла Лагуна – 0,1 м; Ритокюе – 0,1 м; Вальпараисо – 0,1 м

Окончание табл. 1

1	2	3	4
2011-02-11 20:05:30 UTC	36.344° ю.ш. 72.959° з.д.	6,8	Центральная часть Чили. Близлежащие города: 1) 55 км от города Консепсион, Био-Био, 2) 70 км от города Каукьюнес, Мавуле, 3) 80 км от города Чилиан, Био-Био. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Талкахуано – 0,1 м; Эль Потон – 0,1 м; Серо-Верди – 0,1 м; Сан-Висенте – 0,1 м
2010-02-27 06:34:14 UTC	35.909° ю.ш. 72.733° з.д.	8,8	Центральная часть Чили. Близлежащие города: 1) 95 км от города Чили, 2) 105 км от города Консепсион, 3) 115 км от города Талка. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Вальпараисо – 2,61 м; Талькауано – 1,81 м; Кокимбо – 1,64 м; Коррал - 1,44 м; Арика - 1,18 м; Кальдера – 0,9 м; Икике – 0,68 м; Антофагаста и Сан-Педро – 0,47 м
2007-11-14 15:40:50 UTC	22.204° ю.ш. 69.869° з.д.	7,7	Север Чили. Близлежащие города: 1) 35 км от города Токопилья, 2) 100 км от города Калама. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Антофагаста – 0,255 м; Арика – 0,195 м; Икике – 19,3 м; Кальдера – 9,5 м

Землетрясение и цунами у берегов Чили 27 февраля 2010 г. Постановка задачи

В данной главе рассматривается наиболее оптимальная модель реализации катастрофического чилийского землетрясения 27 февраля 2010 г. на основании изученных работ [19-21]. Оценка механизма источника землетрясения была проведена в ряде работ (например [21]), где также был сделан анализ дальнеполевых и ближнеполевых воздействий вызванного им цунами. На данный момент имеется несколько моделей очага землетрясения, базируемых на сейсмологических данных. Для численного моделирования цунами мы использовали модель 1 из работы [21].

Область океана, подверженная таким смещениям, генерирующая цунами, имеет примерно эллиптическую форму, в котором разлом занимает главную ось. Основываясь на изложенных предположениях по вертикальным смещениям океанского дна, исходная высота цунами в генерирующей области оценивается максимум в 1,5–1,7 м выше невозмущенного уровня моря.

Основываясь на геологических и макросейсмических наблюдениях, можно заключить, что землетрясение 27 февраля 2010 г. включало множественные вспарывания смежных разломов и различные вертикальные смещения океанского дна. Наибольшая часть вспарывания землетрясения 2010 г. произошла в первые 60 с, но меньшие смещения продолжались до 200 с. В течение первых 134 с после начала вспарывания и в течение 1 мин только непосредственная область вокруг действительного эпицентра оказалась активной. Во вторую минуту зона активности двигалась на север к Сантьяго. После этого область на север от Консепсьона стала активной на короткое время.

Численное моделирование цунами 27 февраля 2010 г.

Для проведения численного моделирования цунами от сейсмического очага, локализованного вдоль чилийского побережья, была использована расчетная область, выбранная в квадрате 90° з.д. - 60° з.д., 10° ю.ш. – 60° ю.ш. с сеткой, включающей в себя число узлов, равное $1798 \times 2995 = 5385010$. Для моделирования использовалась батиметрия Тихого океана с

разрешением 1 мин. Моделирование проводилось с временным шагом 1с. В последней мористой точке на глубине 10 м поставлено условие полного отражения (вертикальная стенка), позволяющее зафиксировать на этой глубине максимальную и минимальную величины смещения волнового уровня. Моделирование проводилось в рамках нелинейных уравнений мелкой воды [12, 13].

Исходя из принятых предположений по реализации землетрясения, было проведен расчет генерации очага цунами сейсмическим источником при учете только вертикальной составляющей смещения дна. Расчет проводился на базе клавишной модели очага землетрясения [14, 15]. На основании модели, предложенной в [21], был сформирован сейсмический очаг (рис. 1). В связи со сложной структурой предполагаемой модели, очаг был разбит на девять блоков–клавиш. В зависимости от данных по интенсивности афтершоков, указанной в работе [21], при численном моделировании данного землетрясения вертикальное движение блоков задавалось в диапазоне от 2 до 6 м (табл. 2).

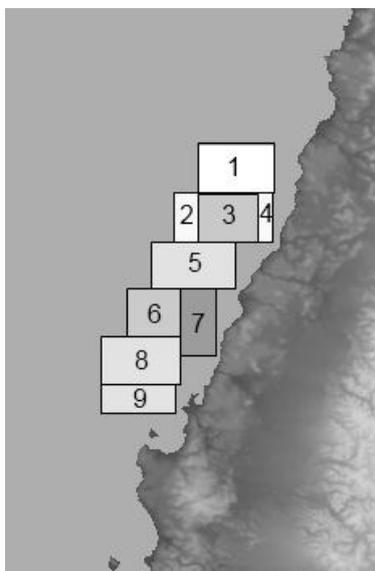


Рис. 1. Модель сейсмического очага расчетного землетрясения

Таблица 2

Параметры блоков-клавиш, принятые для данного моделирования

Номер блока	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Координаты блока $X_1 (E)$	287	286,75	287	287,6	286,5	286,25	286,8	286	286
$Y_1 (N)$	-34	-34,5	-34,5	-34,5	-25	-35,5	-35,5	-36	-36,5
$X_2 (E)$	287	286,75	287	287,6	286,5	286,25	286,8	286	286
$Y_2 (N)$	-34,5	-35	-35	-35	-35,5	-36	-36,2	-36,5	-36,8
$X_3 (E)$	287,75	287	287,6	287,75	287,35	286,8	287,15	286,8	286,75
$Y_3 (N)$	-34	-34,5	-34,5	-34,5	-35	-35,5	-35,5	-36	-36,5
$X_4 (E)$	287,75	287	287,6	287,75	287,35	286,8	287,15	286,8	286,75
$Y_4 (N)$	-34,5	-35	-35	-35	-35,5	-36	-36,2	-36,5	-36,8
Начало движения T_0, c	160	130	80	100	50	20	0	190	220
Время останковки T, c	190	160	100	130	80	50	20	220	250
Высота подъема $B, м$	2	3	5	3	4	4	6	3	2

При выбранном сценарии очаг цунами формируется за 250 с после начала землетрясения. Наибольшая интенсивность в очаге землетрясения была в первые 60 с, при этом были задействованы блоки 7, 3, 5, ориентированные в сторону побережья, а затем активность сейсмического очага переместилась на север (табл. 2).

Расчетная акватория и формирование очага цунами, согласно представленной табл. 2, для девяти моментов времени приведены на рис. 2.

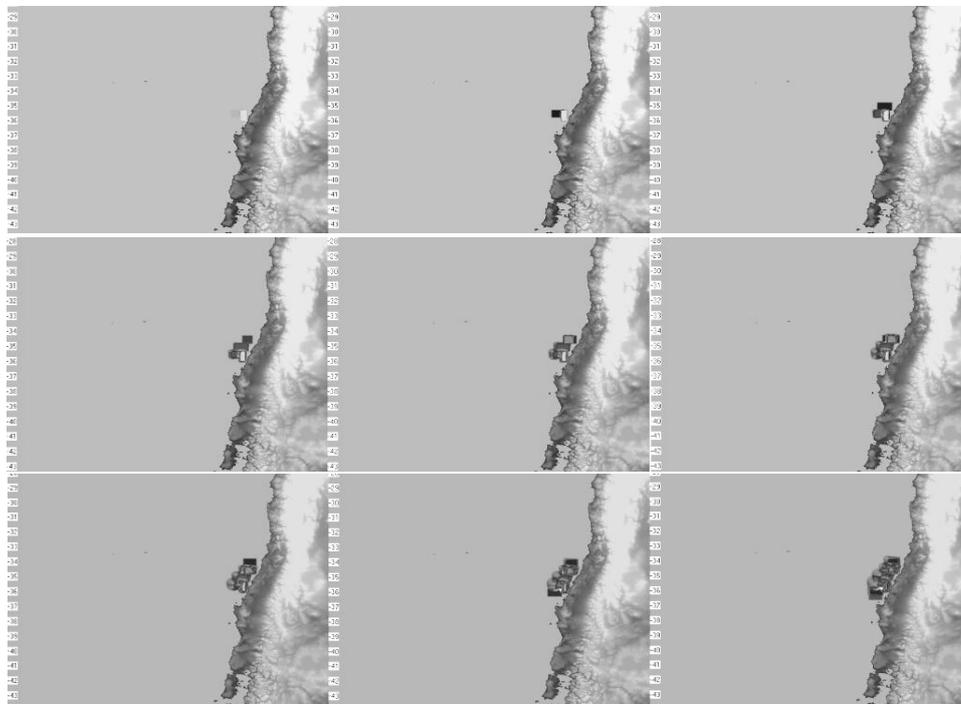


Рис. 2. Генерация очага цунами сейсмическим очагом

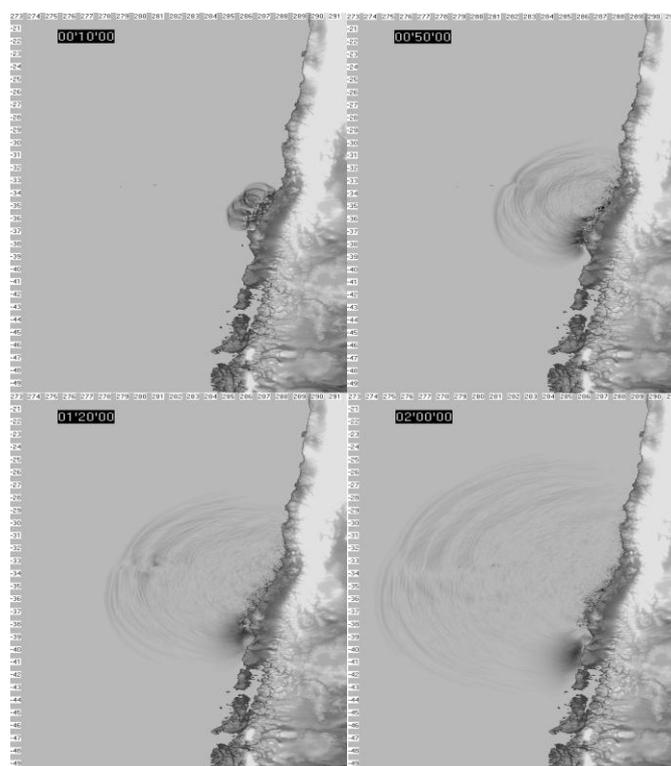


Рис. 3. Генерация волн цунами и их распространение по расчетной акватории при реализации данного сценария

На рис. 3 приведены характерные моменты при распространении волн по акватории для четырех моментов времени. Для данной постановки задачи рассматривается процесс распространения волны только по части акватории Тихого океана – вдоль побережья Чили.

Для данного сценария на рис. 4 приведено максимальное распределение высот волн по части расчетной акватории. Можно видеть, что наибольшие высоты волн локализованы в области очага землетрясения, в то время как вдоль побережья на 10-метровой изобате возможны высоты волн 5-6 м. Проведенное сравнение с данными работ [19-22] показывает, что применение более сложного очага позволяет получить более точные данные по распределению максимальных высот волн по ближайшему побережью. Анализ полученных результатов показывает, что в центральной части акватории были зафиксированы наибольшие высоты волн.

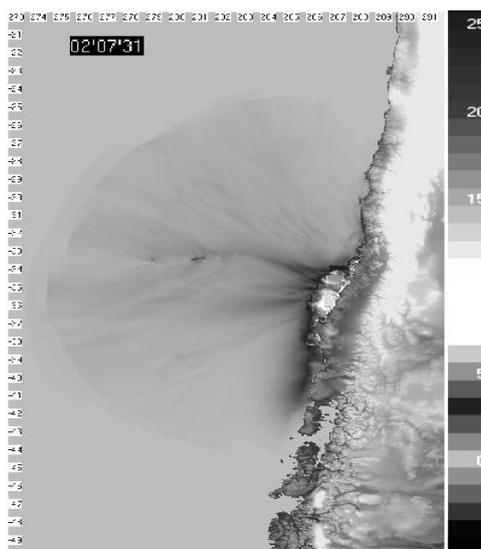


Рис. 4. Распределение максимальных высот волн для части данной акватории по результатам численного моделирования

Землетрясение и цунами 1 апреля 2014 г.

1 апреля 2014 г. в северной части Чили произошло катастрофическое землетрясение в районе г. Икике с магнитудой 8,2. Эпицентр землетрясений находился в районе 20.518° ю.ш. и 70.498° з.д. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах:

Писагуа – 1,7 м; Юнин - 1,7 м; Икике – 1,6 м; Пунта Негра – 1,6 м; Альто Хосписио – 1,6 м; Кьюкумата – 1,3 м; Арика – 0,7 м.

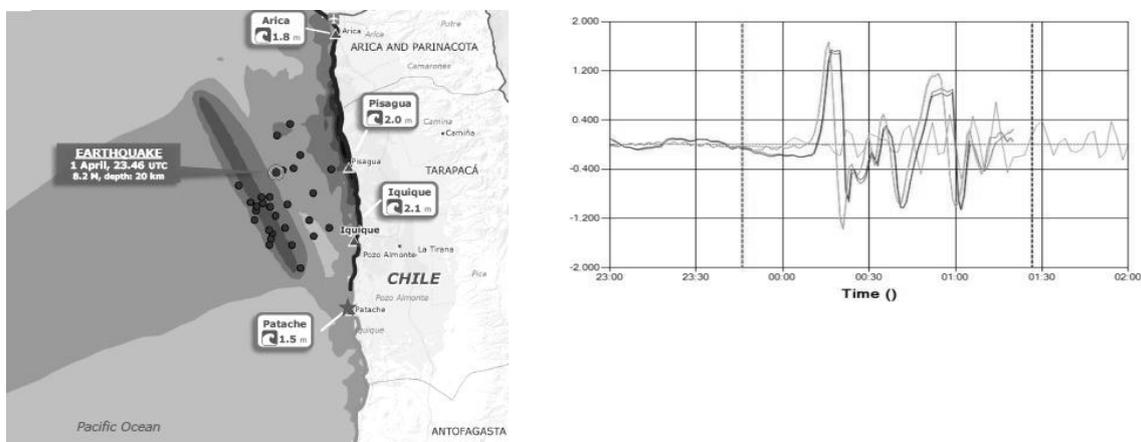


Рис. 5. Локализация очага землетрясения и расположение автershоков в ближайшие два дня после основного толчка и данные с мареографа в п. Патачи (интернет ресурс ECDM_20140402_Chile_Earthquake)

На рис. 5 приведены локализация очага землетрясения и расположение афтершоков в ближайшие два дня после основного толчка и данные с мареографа в п. Патачи.

На рис. 6 приведены формы сейсмического очага при моделировании данного землетрясения по двум сценариям, подобранным согласно направлению сейсмической активности. Для проведения численного моделирования цунами от сейсмического очага, локализованного вдоль чилийского побережья, была использована та же расчетная область, что и при моделировании землетрясения 27 февраля 2010 г.

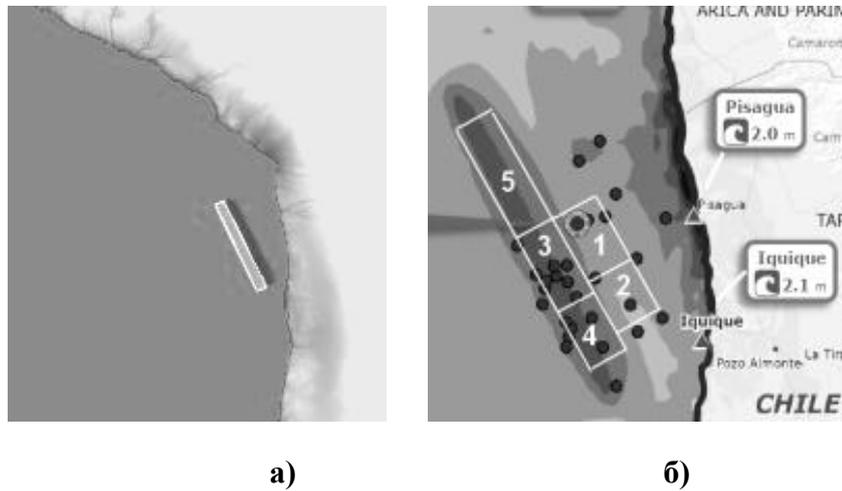


Рис. 6. Форма очага землетрясения 1 апреля 2014 г. для двух сценариев расчета

Первый сценарий выбран в виде узкого длинного дипольного очага, понижением обращенного к берегу. На рис. 7 показаны четыре момента положения фронтов волн при генерации данным очагом (рис. 6, а), а на рис. 8 – мареограмма в п. Патачи, полученная при расчете по первому сценарию.

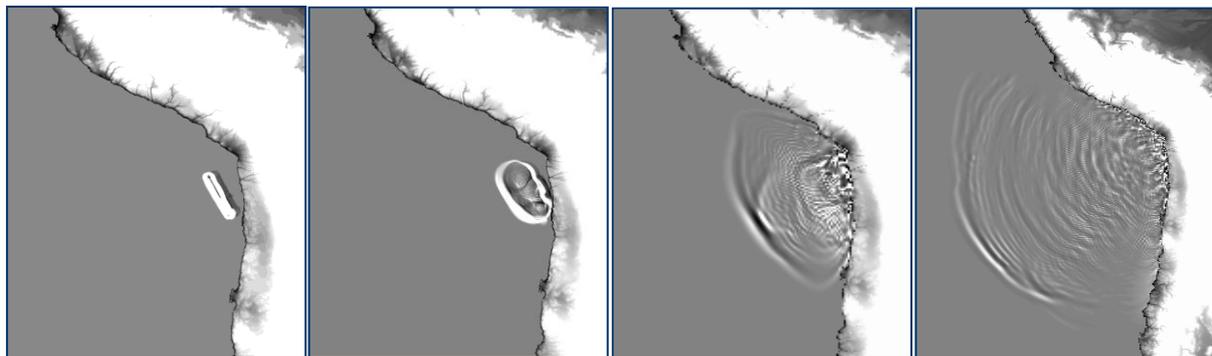


Рис. 7. Генерация очага цунами сейсмическим очагом при расчете по первому сценарию

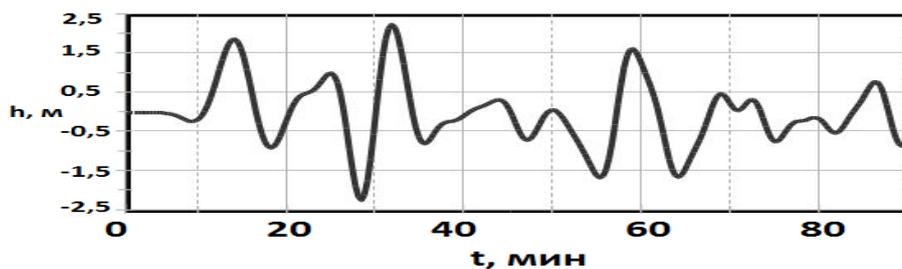


Рис. 8. Мареограмма при расчете по первому сценарию

Хорошо видно, что, хотя первая волна отрицательная, а высота второй совпадает с высотой на реальной мареограмме, но дальнейший вид кривой отличается существенно. Для более детального описания процесса необходимо подобрать форму очага, отвечающую направлению сейсмической интенсивности процесса (см. рис. 6, б).

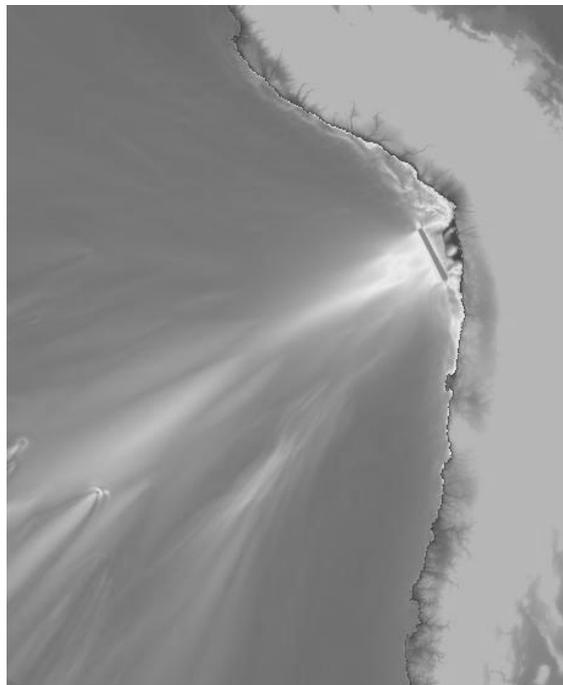


Рис. 9. Распределение максимальных высот волн для части данной акватории по результатам численного моделирования по первому сценарию

Заключение

Проведенное на основе численного моделирования исследование генерации и распространения волн цунами при сильнейших землетрясениях около побережья Чили 27 февраля 2010 г. и предварительный расчет для землетрясения 1 апреля 2014 г. позволяют оценить максимальные высоты наката на всем побережье расчетной акватории, возникшие в результате этих сильнейших землетрясений. Цунами нанесло реальный ущерб на многих участках тихоокеанского побережья Чили - центральной части для землетрясения 2010 г. и северной части при землетрясении 2014 г. Предварительные результаты, полученные в этой работе, позволили получить дополнительные данные по влиянию размеров, направления и интенсивности сейсмических очагов землетрясения в Чили 27 февраля 2010 г. и 01 апреля 2014 г. на параметры вызванного им разрушительного цунами в Тихом океане. Для численного моделирования были использована клавишная модель очагов землетрясения, разработанная на основе дополнительных данных по мониторингу в реальном времени пиков излучения сейсмической энергии [13]. Проведенное численное моделирование очага с разбиением на блоки-клавиши позволило изучить особенности формирования волнового поля как в ближнеполевой, так и в дальнеполевой областях. Сопоставление высот волн цунами, полученных на побережье в результате расчета, и высот, зафиксированных при цунами у берегов Чили в 2010 г., показало реальность полученных данных. Следует особо отметить тот факт, что предварительный прогноз, приведенный в работе [1], оправдался с точностью до отсутствия значительного материального ущерба на побережье и сохранения человеческих жизней, в отличие от землетрясения 1868 г., сравнение с которым и ожидалось в первом-втором десятилетии этой эры.

Библиографический список

1. **Mazova R.Kh, Ramirez J.F.** Tsunami waves with an initial negative wave on the Chilean coast R.Kh. Mazova, J.F. Ramirez // Natural Hazards. 1999. № 20. P. 83–92.
2. **Mazova R.Kh. Soloviev S.L.** On influence of sign of leading tsunami wave on runup height on the coast / R.Kh. Mazova, S.L. Soloviev // Sci.Tsunami Hazards. 1994. № 12. P. 25–31.
3. **Ammon C.J., C.Ji, H.-K. Thio.** Rupture Process of the Great Sumatra-Andaman Earthquake / C.J. Ammon [et al.] // Science. 2005. № 308. P. 1133–1139.
4. **Lay T., Kanamori H., Ammon C.J.** The Great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004 / T. Lay [et al.] // Science. 2005. № 30. P. 1127–1133.
5. **Tsuji, T.** Potential tsunamigenic faults of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake / T. Tsuji [et al.] // Earth Planets Space Lett. 2011. № 63. P. 831–834.
6. **Nakata, T.** Active faults along Japan Trench and source faults of large earthquakes / T. Nakata [et al.] // in Proc. of Int. Symp. on eng. lessons learned from the Great East Japan earthquake (March 1-4, 2012). – Tokyo, Japan. 2012. P. 67.
7. **Зайцев А.И., Куркин А.А., Левин Б.В., Пелиновский Е.Н., Ялчинер А., Троицкая Ю.И., Ермаков С.А.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в Индийском океане / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады Академии наук. 2005. № 402. С. 388–392.
8. **Зайцев А.И., Ковалев Д.П., Куркин А.А., Левин Б.В., Пелиновский Е.Н., Чернов А.Г., Ялчинер А.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады Академии наук. 2008. № 421. С. 249–252.
9. **Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Choi B.H., Lee J.S.** A comparative estimation of the tsunami hazard for the Russian coast of the sea of Japan based on numerical simulation / A.A. Kurkin [et al.] // Oceanology. 2004. № 44. P. 163–172.
10. **Fujii, Y.** Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth Planets Space Lett. 2011. № 63. P. 815–820.
11. **Mazova R., Kisel'man B., N Varanova and L Lobkovsky.** The Indian Ocean tsunami 26 December 2004: analysis of seismic source mechanism / R. Mazova [et al.] // Sci.Tsunami Haz. 2012. № 31. P. 112–128.
12. **Лобковский Л. И., Мазова Р. Х., Кисельман Б. А., Морозова А. О.** Численное моделирование и спектральный анализ цунами 15 ноября 2006 г. в Курило-Камчатском регионе / Л. И. Лобковский [и др.] // Океанология. 2010. № 50. С. 1–10.
13. **Mazova R.Kh., Varanov B.V., Lobkovsky L.I., Varanova N.A., Dozorova K.A., Chaykina O.N.** Numerical Model Study of Possible Earthquake –Generated Tsunami in Komandorsky Seismic Gap, Western Aleutian Island Arc / R. Kh. Mazova [et al.] // Sci.Tsunami Haz. 2014. № 32. P. 131–155.
14. **Лобковский, Л.И.** Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит / Л.И. Лобковский. – М.: Наука, 1988. – 253 с.
15. **Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.** Текущие проблемы геотектоники и геодинамики / Л.И. Лобковский, А.М. Никишин, В.Е. Хаин. – М.: Научный Мир, 2004. – 611 с.
16. **Мурти, Т.С.** Сейсмические морские волны цунами / Т.С. Мурти. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 342 с.
17. **Пелиновский Е.Н., Соловьев С.Л., Мазова Р.Х.** Статистические данные о характере наката волн цунами / Е.Н. Пелиновский, С.Л. Соловьев, Р.Х. Мазова // Океанология. 1983. № 23. С. 932–937.
18. **Голубцова Т.С., Мазова Р.Х.** Накат волны переменной формы / Т.С. Голубцова, Р.Х. Мазова // Колебания и волны в механике сплошной среды. – Горький: ГПИ, 1989. С. 52–63.
19. **Pararas-Carayannis, G.** The earthquake and tsunami of 27 February 2919 in Chile - Evaluation of source mechanism and of near- and far-field tsunami effects // Sci.Tsunami Hazards. 2010. № 29. P. 96–126.

20. **Pritchard M. E., Simons M., Rosen P. A., S. Hensley and F. H. Webb.** Co-seismic slip from the 1995 July 30 Mw =8.1 Antofagasta, Chile, earthquake as constrained by InSAR and GPS observations / M. E. Pritchard [et al.] // *Geophys. J. Int.* 2002. № 150. P. 362–376.
21. **Hamlington, B.D., R.R. Leben, O.A. Godin, J.F. Legeais, E. Gica, and V.V. Titov.** Detection of the 2010 Chilean tsunami using satellite altimetry / B.D. Hamlington [et al.] // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, doi: 10.5194/nhess-11-2391-2011. 2011. P. 2391–2406.
22. **Paula Dunbar, Kelly Stroker, Heather McCullough.** Do the 2010 Haiti and Chile earthquakes and tsunamis indicate increasing trends? / P. Dunbar, K. Stroker, H. McCullough // *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 1. 2010. P. 95–114.

*Дата поступления
в редакцию 10.05.2014*

R.Kh. Mazova¹, J. R. Fernandez², N.A. Baranova¹, A.G. Rassadin¹

CATASTROPHIC EARTHQAKES AND TSUNAMI IN CHILE. EVIDENCE FOR REALIZED PROGNOSIS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Engineering Center for Natural Disaster Mitigation CIMCN²

Purpose: Catastrophic seismic events near Chilean coast and generated by them tsunami are analyzed: 27 February 2010 with magnitude 8.8 in 150 km towards north-east of Concepcion and 1 April 2014 to north of Iquique with magnitude 8.2. It is noted that event occurred 1 April 2014 was predicted in work [1], where there were analyzed all strongest Chilean tsunamigenic earthquakes with sources near the Chilean coast. Analysis of catastrophic earthquakes and tsunamis in given region, localization of source of historical earthquakes and character of generated by them tsunami waves permit authors to make conclusion about possibility of repeated catastrophic earthquake and tsunami in near 10-20 years. The events near Arica in April 2014 are in this time period. Thus, the evidences, presented in given work, support preliminary prognosis made by authors in 1999.

Approach: Confirmation of preliminary prognosis of appearance of catastrophic earthquake and strong tsunami in the region of Arica, Chile to 2019.

Findings: Using results of work obtained and published in 1999 and analyzing events in 27 February 2010 and 1 April 2014, and in more details of last months on earthquakes and tsunamis near the Chilean coast, it was made conclusion about realization of preliminary prognosis about appearance of catastrophic tsunamigenic earthquake near the central part of the Chilean coast, in region of Arica in first 10-20 years of 21 century.

Originality: On the basis of data for last catastrophic earthquake, occurred in 21 century, it was performed a numerical simulation of these events. The confirmation for realized preliminary prognosis of catastrophic tsunami 1 April 2014.

Key words: tsunami, seismic and tsunami dangers, tsunamigenic earthquakes, tsunami waves, numerical simulation, Chilean coast.